

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.012



竖直 U 型地埋管群传热特性模拟

吴暄¹, 侯正芳¹, 周雅慧¹, 刘卫², 路子业¹, 金光¹

(1. 内蒙古科技大学能源与环境学院, 内蒙古包头 014010;

2. 陕西省建筑设计研究院有限责任公司, 西安 710018)

摘要:为了探究不同因素对竖直 U 型地埋管管群传热特性的影响,以竖直 U 型地埋管周围土壤为研究对象,建立三维非稳态传热物理数学模型。在试验验证和单井的研究基础上,以 1 a 为研究周期,分析了地埋管管群排列方式、热泵蓄取功率比以及土壤类型对竖直 U 型地埋管管群周围土壤温度场分布的影响。研究表明:钻井间距一定时,地埋管排列方式对地埋管管群周围土壤温度场分布的影响很小;在热泵运行时间一定时,土壤热扩散系数越大,钻井间土壤温度重叠区域越大;土壤导热系数越大,土壤温度波动幅度越小;蓄取功率比越小,土壤热失衡越严重;对于冬季热负荷较大的地区,可以适当地提高热泵蓄取功率比。所建模型得出的土壤温度值与试验值吻合度较好,其最大误差为 14.2%。

关键词:地埋管;土壤温度;导热系数;热失衡;热扩散系数

中图分类号:TU831.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)04-0081-07

Simulation of heat transfer characteristics of vertical U-shaped buried tubes

Wu Xuan¹, Hou Zhengfang¹, Zhou Yahui¹, Liu Wei², Lu Ziyue¹, Jin Guang¹

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, P. R. China; 2. Shanxi Architectural Design & Research Institute Co., LTD, Xi'an 710018, P. R. China)

Abstract: In order to investigate the influence of different factors on heat transfer law around the Vertical U-Tube ground boreholes' group, three-dimensional physical and mathematical models of unsteady heat transfer were established for the soil around the vertical U-tube ground boreholes' group. The heat storage was studied on the basis of experimental verification and single U, a year was taken as the time domain, the effects of the arrangement of the underground pipe, rate of the heat storage and release and soil type on the soil temperature distribution of the Vertical U-Tube ground boreholes' group were analyzed. The results indicate that the arrangement of the underground pipes has little influence on the soil temperature around

收稿日期:2017-10-01

基金项目:内蒙古自治区科技创新引导奖励资金(2017CXYS-1);内蒙古自治区自然科学基金(2015MS0561、2017NMFG015)

作者简介:吴暄(1976-),男,博士,副教授,主要从事地源热泵技术的开发与应用,E-mail:15947027350@163.com。
金光(通信作者),博士,教授,E-mail:wsgjf@163.com。

Received:2017-10-01

Foundation item: Fund Programs of Technological Innovation & Guide & Reward of Inner Mongolia(No. 2017CXYS-1); Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region(No. 2015MS0561, No. 2017NMFG015)

Author brief: Wu Xuan (1976-), PhD, associate professor, main research interests: research and application of ground source heat pump technology, E-mail:15947027350@163.com.

Jin Guang(corresponding author), PhD, professor, E-mail:wsgjf@163.com.

the buried pipe group when the distance of drilling is constant; The overlay area of soil temperature between drillings increases with the increase of soil thermal diffusivity when operation time is constant; The fluctuation range of soil temperature decrease with the increase of soil thermal conductivity; Heat imbalance of soil becomes serious with the decrease of the heat storage and release rate; For the region of larger heating load, it should appropriately improve rate of the heat storage and release. The soil temperature predicted by the model are in good agreement with the corresponding experimental data, and the maximum relative errors are 14.2%.

Keywords: buried pipe; soil temperature; thermal conductivity; thermal imbalance; thermal diffusivity

地源热泵系统的研究已经很多,尤其是在地埋管换热器与土壤间的传热方面,并获得了相关方面的规律^[1-5]。但是,对土壤储能与释能过程中地埋管周围土壤温度场变化规律的研究甚少,尚处于起步阶段。中国学者大多针对单 U 型地埋管进行研究,尤其是在土壤蓄热和取热的方面。杨卫波等^[6-7]在对传统地源热泵系统研究的基础上,发现传统地源热泵系统长期运行过程中,会导致土壤温度逐年下降,这种现象称之为土壤热失衡;因此,提出了太阳能-地源热泵系统并对其进行实验研究,发现太阳能-地源热泵系统可以补偿传统地源热泵系统长期运行过程中损失的热量,同时可以增加地源热泵系统的使用寿命。李伟等^[8]分析了土壤类型对跨季节蓄热型地源热泵垂直 U 型地埋管周围土壤温度场的影响,结果表明:在热泵蓄热时间相同的条件下,土壤导热系数越小土壤温度越高,且蓄热量也随之增加,但随着热泵运行时间的增加蓄热量基本保持不变;土壤热作用半径随土壤热扩散系数的增加而增加。尚研等^[9]研究了热泵间歇运行模式下,土壤温度变化特性和恢复特性,结果表明:热泵间歇运行模式下较连续运行模式下蓄热量有所提高,且随热泵停机时间的增加而增加。吴暄等^[10]研究了多种因素对土壤蓄热-放热过程中地埋管周围土壤温度传热特性的影响规律,结果表明:流体质量流量对换热量的影响较小,换热量随流体进口温度的增加而增加;土壤蓄热结束恢复阶段,温度变化幅度随径向距离的增加而减小,土壤导热系数越大土壤温度恢复后越接近土壤初始温度值;间歇运行模式下,土壤温度变化幅度随开停比的减小而增加。

目前,大部分学者主要研究了单 U 型地埋管传热特性,而对管群的传热特性研究较少。在地埋管管群中,单 U 型地埋管由于受到周围地埋管传热的影响,使其传热变得更加复杂。同时,查阅相关文献发现,对内蒙包头地区地源热泵管群的研究很少。为此,本文建立了三维非稳态传热模型,在试验验证的基础之上研究了地埋管管群排列方式、热泵蓄取

功率比和不同土壤类型对垂直 U 型地埋管周围土壤温度场的影响规律。

1 垂直 U 型地埋管传热模型

1.1 物理模型

垂直 U 型地埋管换热器与周围土壤的换热性能取决于地埋管与土壤的热物性参数和周围土壤温度场分布,实际地埋管换热器与土壤间的换热十分复杂,为了便于理论分析,作以下假设:

- 1) 垂直 U 型地埋管在钻井内对称分布;
- 2) 每层土壤均为各向同性、均质的多孔介质材料,忽略地埋管外壁与土壤间的接触热阻^[11];
- 3) 忽略热量在纵向方向上的传递,认为热量的传递仅沿径向方向^[12];
- 4) 忽略土壤中热湿迁移耦合作用的影响;
- 5) 采用当量直径法,将垂直 U 型地埋管等效为一当量直径的单管^[13], $d_{eq} = (2d_{po} D_U)^{1/2}$,其中: d_{eq} 为当量管管径,m; d_{po} 为 U 型管外径,m; D_U 为 U 型管管脚间距,m。物理模型见图 1。

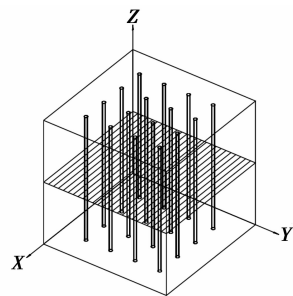


图 1 土壤传热三维简化模型

Fig. 1 Quasi-three-dimensional model of heat storage in soil

1.2 数学模型

1.2.1 控制方程及边界条件 对地源热泵地埋管换热器传热过程分析可知,大概分为管内流体与地埋管内壁间的对流换热、内壁与外壁之间的导热、外壁与回填区域土壤间复杂的换热以及回填区域热量向远处土壤的传递。基于有限体积法,利用软件 MATLAB 进行数值模拟^[14]。将地埋管换热器

以柱热源来处理, 钻孔附近土壤采用加密网格处理, 远处土壤采用标准网格处理, 所涉及到的控制方程为

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_s r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

$$T(z, r, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_0(z, \tau) \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_w (T_a - T(z, r, \tau) \Big|_{z=0}) \quad (3)$$

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=d_{eq}/2} = q(\tau) \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(z, r, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=H} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(z, r, \tau)}{\partial r} \Big|_{r=R} = 0 \quad (6)$$

式(1)~(6)中: ρ_s 为土壤密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; λ_s 为土壤导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; T_a 为室外空气温度, $^{\circ}\text{C}$; H 和 R 分别为钻孔深度和计算半径, m ; α_w 为地表面对流换热系数^[15], $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$; $q(\tau)$ 为单位横截面积单位时间所传递的热量, 即热流密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; 热泵蓄热时热流为正, 取热时热流为负, 停止时热流为零。

1.2.2 模型的试验验证 为了验证所建模型的准确性, 利用所建模型, 对文献[16]中土壤蓄热过程中地埋管管群周围土壤温度进行对比验证。将模拟参数和试验参数保持完全一致(土壤导热系数、土壤密度、土壤比热容和热流密度等), 对比结果见图2。

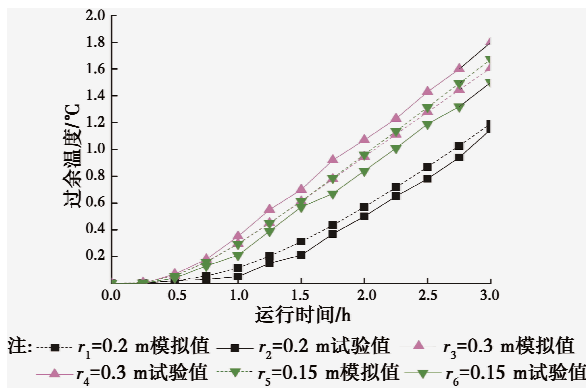


图2 试验值与模拟值对比结果

Fig. 2 Comparison result of calculated and experimental values

从图2中可看出, 试验曲线浮动较大, 这是因为试验过程受外界环境因素的影响较大, 而模拟曲线相对比较平滑, 这是由于模型所建的理想化。对模拟值和试验值相对误差进行定量分析, 结果表明, 最大误差为14.2%, 该模型能够较准确地模拟地埋管周围土壤温度场的变化规律。

1.3 模拟参数的设定

表1给出了内蒙古包头地区地源热泵系统设计

过程中所用的技术参数(文中所有模拟结果都是依据该计算参数)。

表1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

项目	数值
U型地埋管导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	0.50
U型地埋管密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	940
U型地埋管比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	2 300
U型地埋管外径/m	0.038
U型地埋管内径/m	0.032
U型管管脚距离/m	0.05
U型地埋管粗糙度/m	0.001 8
等效管管径/m	0.06
水的比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$	4 200
水的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	998
水的导热系数/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.58
水的运动黏性系数/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0.659×10^{-6}
土壤初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	9.5
土壤导热系数/ $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	1.6
土壤密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 500
土壤比热容/ $(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1})$	1 100
流体流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.6
热流密度/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	60,90
蓄热温度/ $^{\circ}\text{C}$	30
取热温度/ $^{\circ}\text{C}$	7
钻井之间的距离/m	5

2 研究结果与分析

2.1 单地埋管蓄热过程

首先对单井地埋管蓄热过程进行模拟, 然后在单井的基础上, 对热泵全年运行过程中地埋管群周围土壤温度场进行模拟, 主要模拟热泵两种运行模式(蓄热12 h恢复12 h和蓄热8 h恢复16 h)下, 地埋管周围土壤温度场的变化规律, 研究结果见图3。图3给出了两种蓄热模式下地埋管周围土壤温度随热泵运行时间的变化规律。可以看出, 两种运行模式下土壤温度表现为先缓慢下降后急剧上升的变化趋势, 且波动幅度随径向距离的增加而减小; 蓄热时间越长, 同一径向距离下土壤温度变化幅度较大。

对图3(a)中的数值解进行定量分析可知, 热泵运行30 d时, 径向距离为0.4、0.8 m时土壤温度变化幅度分别为4.0、1.84 $^{\circ}\text{C}$; 图3(a)、(b)径向距离为0.6 m时, 对土壤温度波动幅度进行分析, 得出(a)、(b)模式下土壤温度波动幅度依次为2.64、

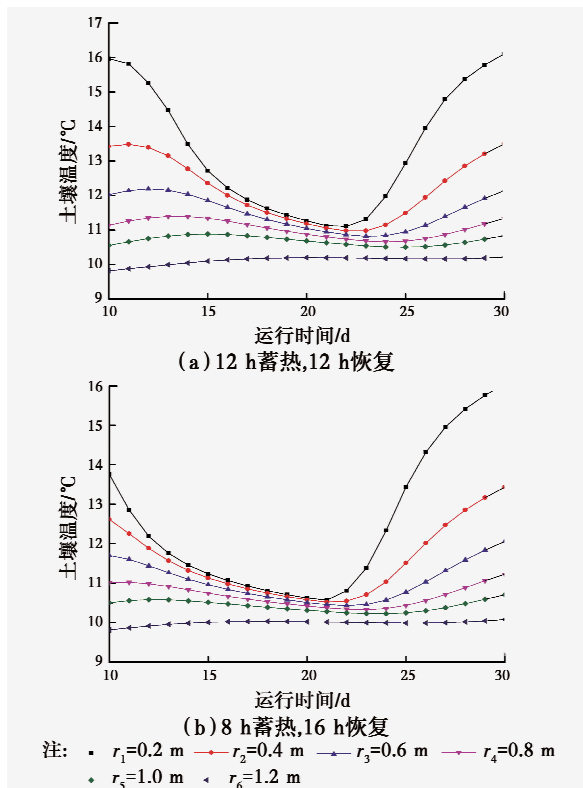


图3 蓄热过程土壤温度变化规律

Fig. 3 The variation of soil temperature in process of heat storage

2.56 °C。

2.2 管群蓄热取热过程

2.2.1 管群全年蓄热取热过程 在单井的研究基础上,对地理管管群全年蓄热取热过程中钻井之间土壤温度场的分布进行模拟研究,选用16口管井(4×4)顺排列,钻井与钻井之间的距离为5 m。根据包头地区全年蓄热取热负荷变化情况(图4),本文模拟时间的设定为:11—3月份为热泵取热阶段,3—6月份为取热结束,土壤恢复阶段,6—9月份为热泵蓄热阶段,9—11月份为热泵蓄热结束,土壤温度恢复阶段,其他模拟参数见表1。

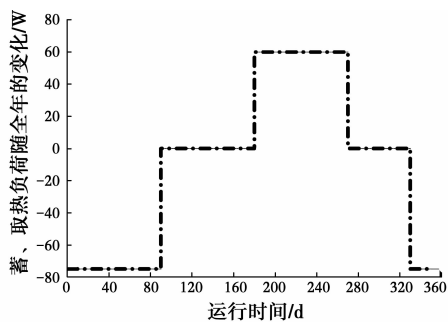


图4 全年蓄热取热负荷变化情况

Fig. 4 Changes of heat storage and release in whole year

研究结果见图5。从图5(a)可以看出,热泵在

经历11—3月份取热结束后,钻井附近土壤温度急剧下降且下降幅度较大,随径向距离的增加土壤温度下降幅度逐渐降低,钻井与钻井间的热影响区域较小。图5(b)给出了取热结束后,经过3个月的恢复后土壤温度分布图。可以看出,钻井间土壤温度分布呈现环状,温度梯度由中心向外部逐渐增加,中心处土壤温度较均匀,且温度梯度较小,而越往边缘处土壤温度梯度越大。图5(c)给出了蓄热3个月结束后土壤温度分布图,可以看出,地理管周围土壤温度较高,且随径向距离的增加土壤温度逐渐降低。图5(d)给出了热泵蓄热结束后经历2个月时间的恢复,钻井间土壤温度分布图。可以看出,相比图5(b)钻井间的土壤温度场,图5(d)土壤温度均匀性较差,分析可知,热泵蓄热结束后,恢复的时间越长,地理管周围土壤温度分布越均匀,而恢复的时间越短,钻井之间的土壤温度梯度越大越不均匀。为了更加确切地看出热泵全年运行过程中土壤温度的变化规律,取钻井与钻井间的中点为研究对象,分析全年运行过程中土壤温度的变化规律。

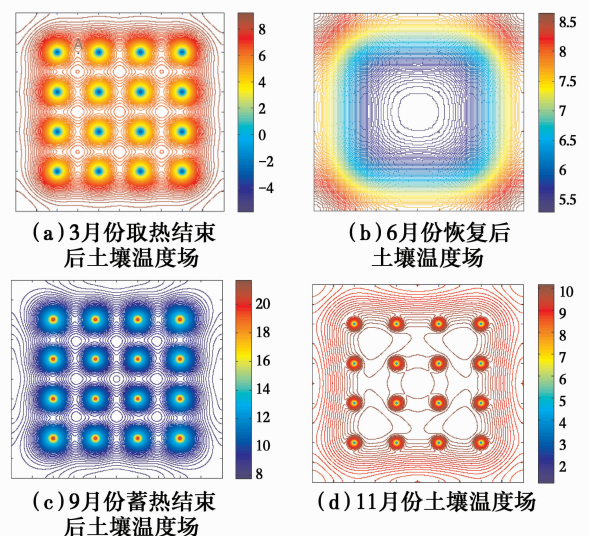


图5 全年蓄热取热过程土壤温度场分布

Fig. 5 Soil temperature distribution in process of heat storage and release in whole year

图6给出了钻井中心处(A点)土壤温度在热泵全年运行过程中的变化规律,可以看出热泵全年运行过程中土壤温度先下降,然后缓慢上升,再急剧上升,之后缓慢下降的变化规律。对图6中的数据进行分析可知,热泵取热结束后(11—3月)土壤温度较土壤初始温度下降3.3 °C,经历(3—6月)恢复后土壤温度为6.3 °C,较取热结束后土壤温度提高约0.2 °C,9月份蓄热结束后土壤温度为9.9 °C,较土壤初始温度提高约0.4 °C;另外对1月1日和12月

1 日土壤温度进行对比,发现热泵运行一年后,钻井中心处土壤温度下降约 0.3 °C,也就是说,地源热泵系统适合用于冬夏负荷基本一致的地区,而对于冬季热负荷大,而夏季冷负荷小的地区,传统地源热泵系统常年运行会导致土壤热失衡(土壤温度偏离土壤初始温度)且失衡率随冬、夏负荷比的增加而增加。

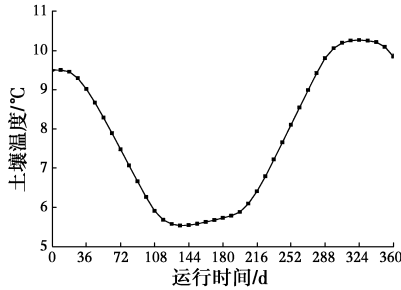


图 6 全年蓄热取热过程土壤温度变化规律

Fig. 6 The variation of soil temperature in process of heat storage and release in whole year

基于此,中国北方地区在使用地源热泵系统的过程中,应采取热补偿措施,如太阳能-地源热泵系统、跨季节蓄热型热泵系统等,以补偿冬季空调负荷较大引起的土壤热失衡问题。

2.2.2 土壤类型对管群全年蓄热取热的影响 主要研究 3 种典型的土壤对管群全年蓄热取热过程土壤温度场的影响,3 种土壤依次为黏土、砾砂和中粗砂,其物性参数见表 2。

表 2 3 种土壤物性参数

Table 2 Thermal properties of three typical soil

土壤	参数
黏土	$\lambda=0.9, C_p=1\ 100, \rho=1\ 500, a=0.50 \times 10^{-6}$
砾砂	$\lambda=2.0, C_p=750, \rho=2\ 000, a=1.34 \times 10^{-6}$
中粗砂	$\lambda=3.1, C_p=1\ 350, \rho=2\ 500, a=0.92 \times 10^{-6}$

注: λ 为导热系数, $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$; C_p 为比热容, $J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$; ρ 为密度, $kg \cdot m^{-3}$; a 为热扩散率, $m^2 \cdot s^{-1}$ 。

研究结果如图 7 所示。图 7 给出了不同土壤结构下 3 月份土壤温度场分布云图,可以看出,钻井周围土壤温度场的分布随土壤结构的改变而发生变化,热泵运行到 3 月份时,土壤温度场出现了不同程度的重叠,重叠的程度由大到小依次为砾沙、中粗砂和黏土。结合表 2 我们可以发现,3 种土壤的热扩散系数砾砂最大,中粗砂次之,黏土最小;也就是说热泵在相同的运行时间下,热量在不同土壤中的传递速率取决于该土壤的热扩散系数(热扩散率),热扩散系数越大热量传递得越远,热作用半径就越大,温度场的重叠区域就越大。从蓄热的角度,应该选

择热扩散系数较小的土壤,例如黏土或中粗砂;对于需要加强热传递的地方,应该选择热扩散系数较大的土壤,例如砾砂。

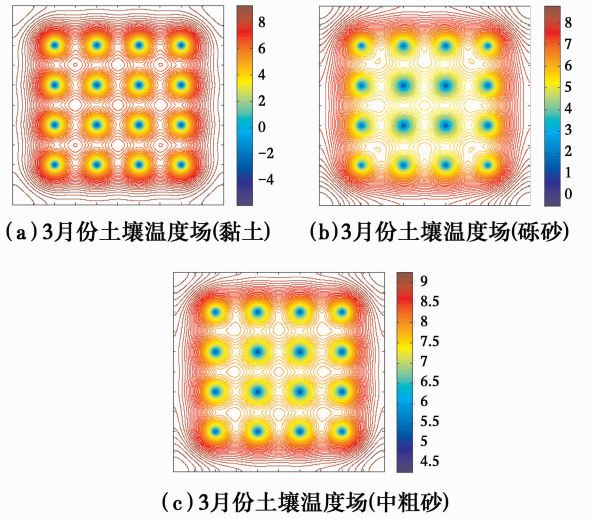
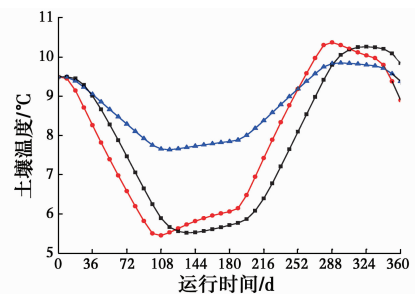


图 7 土壤类型对土壤温度场分布的影响

Fig. 7 Effect of soil types on soil temperature distribution

图 8 反映了热泵全年运行过程中,土壤结构对钻井中心处土壤温度的影响。可以看出,3 种土壤温度变化曲线趋势基本一致,但变化幅度由大到小依次为黏土、砾砂和中粗砂;从热量传递的连续性来看,中粗砂最佳,热泵运行 1 a 周期内温度波动为 2.2 °C,而黏土和砾砂波动幅度分别为 4.7、4.9 °C。结合表 1 中的数据,中粗砂的导热系数最大,砾砂次之,黏土最小。也就是说,土壤导热系数越大,土壤温度变化幅度越小,热泵系统的稳定性越好;而导热系数越小的土壤热泵全年运行过程中,热泵系统的稳定性相对较差。



注: — 黏土 — 砾砂 — 中粗砂

图 8 土壤温度随时间的变化(土壤结构不同)

Fig. 8 The variation of soil temperature with operation time(Different soil types)

2.2.3 蓄取功率比对管群全年蓄热取热的影响

主要研究热泵全年运行过程中,热泵的蓄热功率和取热功率的相对大小,对钻井周围土壤温度场分布的影响。分别选取蓄取功率比为 0.25、0.5、1、

1.25 和 1.5 共 5 种不同功率比,见表 3。

表 3 不同蓄取功率比设计参数
Table 3 Design parameters of different rate of the heat storage and release

蓄热功率/W	取热功率/W	蓄取功率比
15	60	0.25:1
30	60	0.5:1
60	60	1:1
75	60	1.25:1
90	60	1.5:1

图 9 给出了 5 种不同蓄取功率比下,土壤温度场的分布规律。可以看出,随着蓄取功率比的增加,钻井中心处土壤温度逐渐增加;从图中可以看出,蓄取功率比为 1:1 时,热泵全年运行过程中土壤温度保持基本不变,而蓄取功率比为 0.25、0.5 时,土壤温度呈现下降的趋势,对图 9 中的数据分析可知,蓄取功率比为 0.25、0.5 时,钻井中心处土壤温度下降幅度分别为 1.3、0.9 °C;而蓄取功率比为 1.25、1.5 时,钻井处土壤温度增长幅度分别为 0.3、0.7 °C。可以看出蓄取功率等比例增加和等比例降低,土壤温度的增加幅度和下降幅度呈现非线性变化。通过以上分析,可知地源热泵长期运行过程中,一旦出现土壤热失衡问题,土壤温度场很难恢复。因此,在设计地源热泵管群系统时,必须考虑热泵全年运行过程中,冬季和夏季负荷的相对大小。

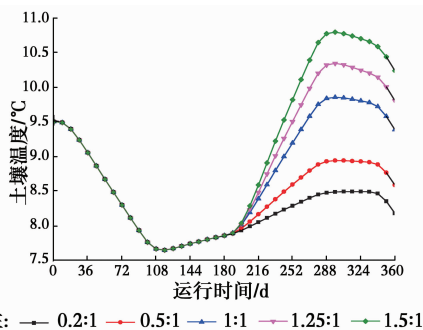


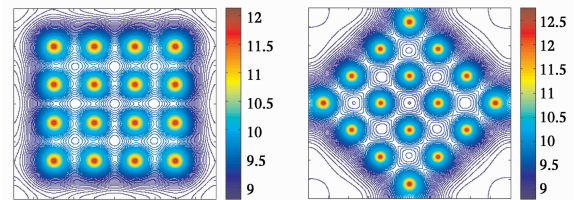
图 9 土壤温度随时间的变化(蓄取功率不同)

Fig. 9 The variation of soil temperature with operation time(Different rate of the heat storage and release)

2.2.4 管群排列方式对管群全年蓄热取热的影响

地理管群系统在实际工程设计过程中,涉及 2 种排列方式,分别为顺排和叉排列,以下主要研究地理管群顺排和叉排列方式下,钻井间土壤温度场的分布。

图 10 给出热泵蓄热结束后钻井间土壤温度分布云图。可以看出,地理管群在顺排列和叉排列方式下土壤温度场分布基本一致,也就是说地理管群的排列方式对土壤温度场的分布基本没有影响。图 11 给出了热泵在顺排和叉排两种模式下,钻井与钻井中点处土壤温度随时间的变化规律。可以看出,热泵在运行 108~208 d 之间,温度变化曲线有微小的差别,其他时间段内温度曲线均重合。



(a) 9 月份土壤温度场(顺排) (b) 9 月份土壤温度场(叉排)

图 10 地理管排列方式对土壤分布的影响

Fig. 10 Effect of buried pipe's arrange style on soil temperature distribution

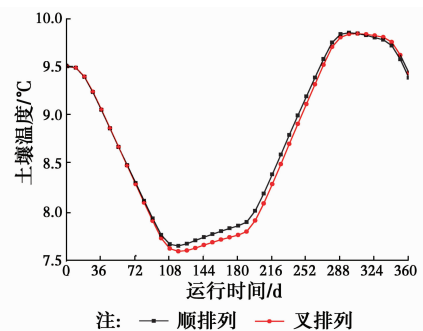


图 11 土壤温度随时间的变化(排列方式不同)

Fig. 11 The variation of soil temperature with operation time(Different arrange style)

3 结论

1) 单井蓄热恢复运行过程中,恢复时间越长土壤温度波动幅度越小,a 和 b 两种模式下,土壤温度波动幅度分别为 2.64 °C 和 2.56 °C。

2) 热泵运行一年过程中,钻井中心处土壤温度经历了先下降之后缓慢上升,然后急剧上升之后缓慢下降的过程;同时,蓄热、取热结束后恢复的时间越长,土壤温度场分布越均匀。

3) 土壤热扩散系数越大,钻井间土壤温度场重叠区域越大,热量传递越快;土壤温度全年的波动幅度随导热系数的增加而减小。

4) 蓄热、取热功率比越小,土壤热失衡越严重;对于冬季热负荷较大的区域,应适当提高蓄热、取热功率比;地理管排列方式对管群周围土壤温度场的

分布几乎没有影响。

参考文献:

- [1] HAN C, YU X. Sensitivity analysis of a vertical geothermal heat pump system [J]. *Applied Energy*, 2016, 170:148-160.
- [2] CARLI M D, FIORENZATO S, ZARRELLA A. Performance of heat pumps with direct expansion in vertical ground heat exchangers in heating mode [J]. *Energy Conversion & Management*, 2015, 95: 120-130.
- [3] LEE C K, LAM H N. Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems [J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(6): 1286-1296.
- [4] ZENG H, DIAO N, FANG Z. Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2003, 46(23):4467-4481.
- [5] CUI P, YANG H, FANG Z. Heat transfer analysis of ground heat exchangers with inclined boreholes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26 (11/12): 1169-1175.
- [6] 杨卫波, 施明恒, 陈振乾. 太阳能-U形埋管土壤蓄热特性数值模拟与实验验证 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2008, 38(4):651-656.
YANG W B, SHI M H, CHEN Z Q, et al. Numerical simulation and experimental validation of energy storage characteristics of solar-U-tube soil [J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2008, 38(4):651-656. (in Chinese)
- [7] 杨卫波, 倪美琴, 施明恒, 等. 太阳能-地源热泵系统运行特性的试验研究 [J]. *流体机械*, 2009, 37(12): 52-57.
YANG W B, NI M Q, SHI M H, et al. Experimental study on operation characteristic of solar ground source heat pump system [J]. *Fluid Machinery*, 2009, 37 (12):52-57. (in Chinese)
- [8] 李伟, 李新国, 赵军, 等. 土壤蓄热特性与模拟研究 [J]. *太阳能学报*, 2009, 30(11):1491-1495.
LI W, LI X G, ZHAO J, et al. Study on heat storage characteristics of soil and simulation [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, 30(11):1491-1495. (in Chinese)
- [9] 尚妍, 李素芬, 代兰花. 地源热泵间歇运行地温变化特性及恢复特性研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2012, 52 (3):350-356.
SHANG Y, LI S F, DAI L H. Study of characteristics of soil temperature variation and recovery under intermittent operation of ground-source heat pump [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2012, 52 (3):350-356. (in Chinese)
- [10] 吴暄, 刘卫, 路子业, 等. 土壤蓄热-放热过程中埋管周围土壤温度特性模拟 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33 (3):204-213.
WU X, LIU W, LU Z Y, et al. Simulation on temperature variation characteristics of soil around buried pipe in process of heat storage and release [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(3):204-213. (in Chinese)
- [11] 张平, 宣益民, 李强. 界面接触热阻的研究进展 [J]. *化工学报*, 2012, 63(2):335-349.
ZHANG P, XUAN Y M, LI Q. Development on thermal contact resistance [J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(2):335-349. (in Chinese)
- [12] BENAZZA A, BLANCO E, AICHOUBA M, et al. Numerical investigation of horizontal ground coupled heat exchanger [J]. *Energy Procedia*, 2011, 6(6): 29-35.
- [13] GU Y, O'NEAL D L. Development of an equivalent diameter expression for vertical U-Tubes used in ground-coupled heat pumps [J]. *Ashrae Transactions*, 1998, 104(2):347-355.
- [14] VUORINEN V, KESKINEN K. DNSLab: A gateway to turbulent flow simulation in Matlab [J]. *Computer Physics Communications*, 2016, 203:278-289.
- [15] DUFFIE J A, BECKMAN W A, MCGOWAN J. *Solar engineering of thermal processes* [J]. Wiley, 1980, 116 (1):549.
- [16] 裴秉科, 周亚素, 何侃, 等. 热流密度对垂直埋管群周围土壤温度的影响 [J]. *建筑热能通风空调*, 2012, 31(2):19-21.
PEI B K, ZHOU Y S, HE K, et al. Heat transfer analysis of Different heat flux on the temperature of vertical pipe group's surrounding soil [J]. *Building Energy & Environment*, 2012, 31 (2): 19-21. (in Chinese)

(编辑 胡玲)